中国生态农业学报 2017 年 6 月 第 25 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2017, 25(6): 812−820

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.161016

傅伟, 刘坤平, 陈洪松, 陈香碧, 林海飞, 张伟, 王克林. 等氮配施有机肥对喀斯特峰丛洼地农田作物产量与养分平衡的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 812−820

Fu W, Liu K P, Chen H S, Chen X B, Lin H F, Zhang W, Wang K L. Effect of partial replacement of inorganic N with organic manure on crop yield and soil nutrient balance in arable ecosystem in karst peak-cluster depression[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 812−820

等氮配施有机肥对喀斯特峰丛洼地农田作物产量与养分平衡的影响*

傅 伟[1,2], 刘坤平[1,2], 陈洪松[1,2], 陈香碧[1,2], 林海飞[1,2], 张 伟[1,2], 王克林[1,2]**

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所/中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室 长沙 410125;
2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站 环江 547100)

摘 要: 基于自 2006 年在广西喀斯特峰丛洼地区开展的长期玉米/大豆套作定位施肥试验, 选择 2010—2014 年监测数据, 探讨等氮量投入条件下, 不同比例有机肥替代无机氮肥对喀斯特峰丛洼地玉米/大豆套作系统作物产量及土壤养分的影响, 为喀斯特峰丛洼地农田作物高效施肥及提高土壤肥力提供理论依据。试验选取 4 个处理: 对照(不施肥, CK)、平衡施用化肥(NPK)、有机粪肥替代 30%化肥氮(C7M3, 按氮素计算, 不足 30%的 PK 用无机肥补充, 肥料总量与 NPK 处理相同, 有机粪肥为牛粪, 下同)、有机粪肥替代 60%化肥氮(C4M6, 按氮素计算, 不足 60%的 PK 用无机肥补充), 每个处理 4 次重复。于 2010 年、2012 年、2014 年大豆收获后采集土壤样品, 测定土壤养分状况。结果表明: 1)施肥处理土壤有机质、全氮、速效磷及速效钾含量均高于 CK 处理, 其中 C4M6 处理有机质含量显著高于 NPK 处理($P<0.05$), 全氮、速效磷和速效钾含量随着有机粪肥施用量的增加而增加。2)长期不同施肥处理玉米和大豆产量分别是不施肥处理的 4.15~4.36 倍、2.47~2.58 倍。不同施肥处理的增产效果为 C4M6>NPK>C7M3, 但施肥处理间差异不显著($P>0.05$)。3)长期不施肥 CK 处理玉米产量随着试验年限推移呈下降趋势, 降幅为 5.45 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$, 大豆产量却表现出增加趋势, 增幅为 1.50 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$。长期施肥处理中, 玉米和大豆产量总体呈增加趋势。4)施肥处理中, 玉米季表现为钾素亏缺(NPK 处理除外), 大豆季表现为氮素亏缺。综合两季作物, 只有 C4M6 钾素表现亏缺, 亏缺量为 7.9 $kg\cdot hm^{-2}$。磷素在各施肥处理中盈余量较大, 分别为 81.2 $kg\cdot hm^{-2}$ (NPK)、83.4 $kg\cdot hm^{-2}$ (C7M3)和 74.8 $kg\cdot hm^{-2}$ (C4M6)。综上, 在喀斯特峰丛洼地玉米/大豆套作制度下, 基于作物产量及土壤养分表观平衡特征提出有机粪肥可以代替部分化肥施用, 在玉米季适当"减氮、稳磷和增钾", 大豆季"稳氮、减磷和减钾"的施肥措施。

关键词: 喀斯特峰丛洼地; 玉米/大豆套作; 有机肥代替化肥; 作物产量; 养分平衡

中图分类号: S-3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)06-0812-09

Effect of partial replacement of inorganic N with organic manure on crop yield and soil nutrient balance in arable ecosystem in karst peak-cluster depression*

FU Wei[1,2], LIU Kunping[1,2], CHEN Hongsong[1,2], CHEN Xiangbi[1,2],

* 国家重点研发计划项目课题(2016YFC0502406, 2016YFD0200106-5)、中国科学院科技服务网络计划(STS)项目(KFJ-EW-STS-092)、国家生态系统观测研究网络运行服务项目"环江站观测研究及数据信息系统建设Ⅱ"资助

** 通讯作者: 王克林, 主要从事景观生态与区域生态研究。E-mail: kelin@isa.ac.cn
傅伟, 主要从事喀斯特生态系统服务功能研究与数据信息管理。E-mail: weif@isa.ac.cn

收稿日期: 2016-11-12 接受日期: 2016-12-20

* This study was funded by the National Key Research and Development Project of China (2016YFC0502406, 2016YFD0200106-5), the Science and Technology Service Network Initiative of Chinese Academy of Sciences (KFJ-EW-STS-092) and the Service Sharing of Chinese National Ecosystem Research Network "Observation, Research and Construction of Data Information System in Huanjiang Ⅱ".

** Corresponding author, E-mail: kelin@isa.ac.cn

Received Nov. 12, 2016; accepted Dec. 20, 2016

LIN Haifei[1,2], ZHANG Wei[1,2], WANG Kelin[1,2**]

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China)

Abstract: Based on a long-term experiment on maize-soybean relay intercropping system in the karst peak-cluster depression in Guangxi, the effects of organic nitrogen (manure) in place of chemical nitrogen (fertilizer) on crop yield and soil nutrient balance were investigated. The experiment was started in 2006, and the data were collected in 2010–2014. Four treatments with four repetitions were designed in the study — including CK (no fertilizer), NPK (chemical fertilizer in maize at N 200 $kg\cdot hm^{-2}$, P_2O_5 90 $kg\cdot hm^{-2}$, K_2O 120 $kg\cdot hm^{-2}$; and in soybean at N 22.5 $kg\cdot hm^{-2}$, P_2O_5 60 $kg\cdot hm^{-2}$, K_2O 67.5 $kg\cdot hm^{-2}$), C7M3 (the total amounts of N, P and K were same as NPK treatment, in which 70% N was from chemical fertilizer and 30% N from organic cattle manure), and then C4M6 (60% N was from organic cattle manure and 40% N from chemical fertilizer, the amounts of P and K were the same as the treatment NPK). The results showed that: 1) compared with CK, treatments of NPK, C7M3 and C4M6 all increased soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK). Furthermore, SOM content in C4M6 was significantly higher than that in NPK ($P < 0.05$). The contents of TN, AP and AK increased with increasing organic manure supplement. 2) The yields of maize and soybean in the fertilizer treatments were respectively 4.15–4.36 and 2.47–2.58 times higher than that in CK. Crop yield order in fertilizer treatments was C4M6 > NPK > C7M3, but there was no significant difference among treatments ($P > 0.05$). 3) For CK treatment, maize yield decreased by 5.45 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$, while soybean yield increased by 1.50 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$ during experimental period. The yields of both maize and soybean increased under long-term fertilization as the experiment went on. 4) In the experiment, K deficit was observed in organic manure treatments and CK during maize growth period, but N deficit appeared in all treatments during soybean growth period. In the maize-soybean relay intercropping system, K deficit of 7.9 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ was observed only in C4M6. P surplus was observed for all fertilizer treatments with surplus amounts of 81.2 $kg(P)\cdot hm^{-2}$, 83.4 $kg(P)\cdot hm^{-2}$ and 74.8 $kg(P)\cdot hm^{-2}$ in NPK, C7M3 and C4M6 treatments, respectively. In summary, based on the characteristics of nutrient balance and crop yield, that partial replacement of chemical nitrogen fertilizer by cattle manure was reasonable. We recommend that farmers should "reduce N, maintain P and increase K" during maize growth period, but should "maintain N and reduce P and K" in soybean growth period in maize-soybean agricultural ecosystem in karst peak-cluster depression areas.

Keywords: Karst peak-cluster depression; Maize-soybean relay intercropping; Replacement of chemical fertilizer with organic manure; Crop yield; Nutrient balance

峰丛洼地是广西喀斯特地貌的主要类型，其中以桂西北地区分布最广、最为连片。峰丛洼地生态环境脆弱性突出，土壤浅薄、农业活动的扰动容易引发水土流失、漏失，导致生态系统退化的石漠化现象发生，因此这一地区农田以中低产田为主，其土壤养分亏缺或养分不平衡[1-3]。如何让农田稳产或增产的同时，又能够保持土地利用的可持续性，对于桂西北峰丛洼地区农业生产显得尤为重要。施用有机肥是通过向土壤中输入有机质，增加土壤碳氮储量，是改善土壤理化特性、提高土壤地力的重要措施[4-5]。与此同时，有机无机肥的配合施用，结合了化肥速效性与有机肥持久性的特点，对提高土地生产力和改善土壤性状起到明显作用[6-7]。林治安等[8]研究结果显示，有机肥与化肥均表现出持续提高土壤有机碳、氮含量的作用，有机肥效果明显优于化肥，并且随有机肥用量的增加而增加。高洪军等[9-10]通过对 25 年长期施肥条件下黑土区玉米(*Zea mays*)产量数据分析，发现施化肥或有机肥配施化肥玉米产量显著高于不施肥处理，且长期有机无机肥配施模式玉米产量总体上表现为上升趋势，在等氮量的化肥以及化肥配施有机肥处理下玉米平均产量差异不显著。陈志龙等[11]通过田间试验研究了黄棕壤地区等氮量条件下以有机肥不同比例替代化肥氮对小麦(*Triticum aestivum*)生长及氮肥利用率的影响，发现25%有机肥替代氮肥处理效果最好。调查发现，广西峰丛洼地农业生产中肥料投入以氮肥为主，有机肥施用不足，且有机肥和化肥配施更少[12]；与此同时，随着当地畜牧业与桑蚕养殖业以及蔗糖、木薯淀粉、茉莉花茶等涉农加工业的发展，产生了大量禽畜粪便、蔗糖滤泥、木薯皮、木薯淀粉渣和茉莉花渣等有机废弃物。这些有机废弃物资源未得到科学合理的利用，造成农田、地下水污染等安全隐患[13-14]。本研究基于 2006 年开始的长期定位施肥试验，分析在喀斯特峰丛洼地玉米套作大豆(*Glycine max*)这一传统种植制度下，等量氮肥配施不同比例有机粪肥对作物产量及养分平衡状况的影响，探讨有机粪肥氮代替化学氮肥的效果，为设计合理的粪肥与化肥配施比例提供数据支持，以期为当地农村资源化利

用有机废弃物提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站(24°43′N~24°45′N, 108°18′E~108°20′E), 属中亚热带季风气候区, 多年平均气温 19.9 ℃, 年均≥10 ℃积温 6 300 ℃, 无霜期 300~330 d。年均降雨量 1 400 mm, 其中 4—8 月份为雨季, 降雨量占全年的 70%以上, 9 月份至翌年 3 月份为旱季。年平均日照 1 400 h, 平均太阳总辐射量 400 $kJ\cdot cm^{-2}$, 其中有效辐射量为 200 $kJ\cdot cm^{-2}$。研究区为典型的峰丛洼地景观, 发育基岩为白云岩, 地势四周高, 中间低, 最高点海拔 647.2 m, 最低点海拔 262 m。发育土壤主要为棕色石灰土, 土层厚 30~200 cm。试验前土壤 pH 7.13、有机质(SOM) 43.04 $g\cdot kg^{-1}$、全氮(TN) 2.24 $g\cdot kg^{-1}$、全磷(TP) 1.35 $g\cdot kg^{-1}$、全钾(TK) 13.39 $g\cdot kg^{-1}$。

1.2 试验设计

长期定位试验样地建立于 2006 年。采用随机区组, 设置 6 种施肥处理方式, 每个处理 4 次重复。小区间用厚 20 cm 的水泥板间隔, 水泥板埋深不低于 50 cm, 每个小区大小为 4 m×7.5 m。种植作物为玉米/大豆套作, 开垦前植被为草丛, 优势种为臭蒿(*Artemisia hedinii*)、蔓生莠竹(*Microstegium vagans*)等。本研究选取其中 4 个处理, 分别为: ①CK, 不施肥处理; ②NPK: 无机肥施用处理, 施用的无机肥分别为尿素、钙镁磷肥和氯化钾, N、P_2O_5和 K_2O 施用量分别为, 玉米季 200.0 $kg\cdot hm^{-2}$、90.0 $kg\cdot hm^{-2}$ 和 120.0 $kg\cdot hm^{-2}$, 大豆季 22.5 $kg\cdot hm^{-2}$、60.0 $kg\cdot hm^{-2}$和 67.5 $kg\cdot hm^{-2}$; ③C7M3: 70%NPK+30%农家肥(按氮素计算, 不足 30%的 P、K 用无机肥补充, 肥料总量与处理②相同, 农家肥为牛粪, 下同); ④C4M6: 40%NPK+60%农家肥(按氮素计算, 不足 60%的 PK 用无机肥补充)。

本文以2010—2014年监测数据为分析对象, 春玉米品种为'瑞单 8 号', 夏大豆品种为'桂春 5 号'。春玉米穴播, 行距 100 cm, 株距 50 cm, 每个小区播种 4 行, 在小区中间 2 m 处开一排水沟; 大豆通常在玉米采收前 20 d 左右, 采用穴播方式套种在玉米行两侧。中耕、除草及病虫害防治等其他农艺措施按常规进行。

1.3 样品采集与测定

按照国家生态系统研究网络(CERN)的监测要求, 作物产量于每季收获期考种而得, 玉米收获期, 每个小区各取植株样品 10 株为 1 个混合样; 黄豆收获期, 每个小区取植株样品 15 株为 1 个混合样, 人工脱粒, 晒干后称取风干质量。测定样品含水率, 计算作物产量, 秸秆烘干计算秸秆量。土壤样品于 2010 年、2012 年、2014 年大豆收获后采集, 每个小区随机采集 8 个耕作层土样(0~20 cm), 组成 1 个混合样品, 对每个混合样品取约 200 g 进行风干, 过 20 目和 100 目筛, 待测定养分用。采用常规分析方法测定土壤有机质(重铬酸钾-外加热法)、全氮(开氏法消煮-流动注射仪测定法)、有效磷(碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法)、有效钾(乙酸铵提取-原子吸收仪测定法)和 pH(电位法, 土水比 1∶2.5)等[15]。

1.4 计算与分析方法

土壤养分表观平衡($kg\cdot hm^{-2}$)=有机和化学肥料投入总量–作物养分吸收量 (1)

玉米和大豆植株养分含量以 2010—2014 年各小区测定的平均值计算。植株养分吸收量依据作物籽粒和秸秆历年产量均值计算。本研究不考虑通过种子、作物根茬、降水、生物固氮和干湿沉降等途径进入土壤的养分量和通过氨挥发、N_2O 排放和淋失等途径损失的养分量。

采用 Microsoft Excel 2010 和 DPS 分别对数据进行作图和统计分析, 数据主要采用单因素方差分析(LSD), 显著水平设定为α=0.05。

2 结果与分析

2.1 等氮配施有机肥对土壤养分含量变化的影响

配施有机氮肥, 可增加土壤有机质含量(表 1)。从 2010 年、2012 年到 2014 年土壤有机质均值比较来看, 30%有机氮肥(C7M3)、化肥(NPK)及不施肥(CK)处理间土壤有机质含量无显著差异(P>0.05), 添加 60%有机氮肥(C4M6)显著提高了土壤有机质含量(P<0.05)。土壤全氮含量在 4 个处理中差异不显著(P>0.05), 但 CK 处理最低, C4M6 处理最高。土壤速效磷和速效钾含量随添加有机肥量增大而增加, 表现为 C4M6>C7M3>NPK>CK, 其中施肥处理速效磷含量显著高于不施肥处理, 约是不施肥处理的 3.1~3.4 倍, 施肥处理间差异不显著; C4M6 处理的速效钾含量显著大于化肥(NPK)及不施肥(CK)处理, 与 C7M3 处理差异不显著, C7M3 处理速效钾含量大于 NPK 处理, 但差异不显著(P>0.05)。说明有机肥代替部分化学肥料可以保持土壤中速效养分含量与施用纯化肥处理相当水平, 并有增加趋势。从几年数据分析来看, 不施肥和施化肥处理土壤 pH 呈逐年降低趋势, 添加有机肥处理土壤 pH 呈上升趋势, 但各处理差异不明显。综合来看, 有机氮肥代替部分化学氮肥有利于土壤养分的积累。

表 1　等氮配施有机肥处理下玉米/大豆套作土壤养分变化

Table1　Soil nutrients under different fertilization treatments of maize-soybean relay intercropping system

处理 Treatment	年份 Year	有机质 Soil organic matter ($g\cdot kg^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($g\cdot kg^{-1}$)	速效磷 Available phosphorus ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($mg\cdot kg^{-1}$)	pH
CK	2010	36.6±1.5	1.94±0.10	5.54±0.83	68.57±3.90	7.45±0.06
	2012	40.1±3.5	1.87±0.04	3.65±0.53	61.01±3.16	7.42±0.04
	2014	36.2±1.5	1.57±0.07	7.27±0.52	66.72±11.59	6.93±0.34
	平均 Average	37.6b	1.79a	5.50b	65.43c	7.27a
NPK	2010	38.7±3.1	2.05±0.15	20.50±1.51	272.77±29.85	7.51±0.10
	2012	39.7±2.7	1.93±0.07	13.03±1.05	221.50±8.31	7.37±0.07
	2014	37.1±2.7	1.68±0.17	18.26±1.87	191.91±15.67	7.44±0.09
	平均 Average	38.5b	1.88a	17.27a	228.73b	7.44a
C7M3	2010	36.3±0.87	1.94±0.06	18.25±2.74	294.96±25.76	7.37±0.05
	2012	37.7±0.97	1.90±0.02	10.73±0.37	275.43±20.53	7.32±0.03
	2014	36.9±1.88	1.64±0.07	26.11±2.45	239.54±13.14	7.52±0.06
	平均 Average	37.0b	1.83a	18.33a	269.97ab	7.40a
C4M6	2010	43.6±2.37	2.27±0.07	19.62±2.37	381.15±40.82	7.42±0.09
	2012	43.3±1.0	2.23±0.08	14.90±1.74	367.16±33.77	7.40±0.05
	2014	41.3±3.0	1.78±0.17	21.19±2.64	223.91±12.70	7.58±0.12
	平均 Average	42.8a	2.09a	18.56a	324.07a	7.46a

CK: 不施肥; NPK: 无机肥施用; C7M3: 70%NPK+30%农家肥; C4M6: 40%NPK+60%农家肥。不同小写字母表示该养分的年际均值在不同处理间具有显著差异($P<0.05$)。CK: no fertilizer; NPK: chemical fertilizers; C7M3: 70% N coming from chemical fertilizer, and 30% N coming from cattle manure; C4M6: 40% N coming from chemical fertilizer, and 60% N coming from cattle manure. Different lowercase letters indicate significant differences in average of three years at 5% level among different treatments.

2.2　等氮配施有机肥作物平均产量

从作物平均产量来看(图 1), 在喀斯特峰丛洼地, 长期施肥极显著提高了作物产量($P<0.01$)。对 5 年中作物产量统计发现, 化肥处理(NPK)、30%有机氮肥处理(C7M3)及 60%有机氮肥处理(C4M6)玉米年均产量分别是不施肥(CK)处理的 4.24 倍、4.15 倍和 4.36 倍, 大豆产量分别是 CK 处理的 2.56 倍、2.47 倍和 2.58 倍。可见, 在喀斯特峰丛洼地上, 施用肥料对作物产量具有极显著提高作用。施肥处理间产量略有差异, 但差异不显著($P>0.05$), 说明在喀斯特棕色石灰土上, 一定量的有机氮肥可以代替部分化肥施用。

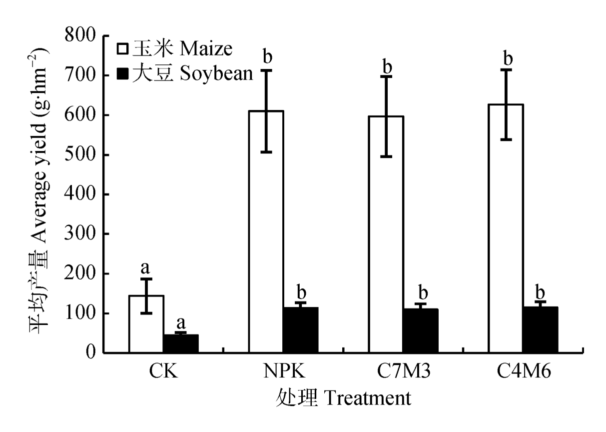


图 1　等氮配施有机肥条件下玉米/大豆套作系统的作物平均产量

Fig. 1　Average grain yields of maize-soybean relay intercropping system under different fertilization treatments

CK: 不施肥; NPK: 无机肥施用; C7M3: 70%NPK+30%农家肥; C4M6: 40%NPK+60%农家肥。不同小写字母表示同一作物不同处理间具有显著差异($P<0.05$)。CK: no fertilizer; NPK: chemical fertilizers; C7M3: 70% N coming from chemical fertilizer and 30% N coming from cattle manure; C4M6: 40% N coming from chemical fertilizer and 60% N coming from cattle manure. Different lowercase letters indicate significant differences at 5% level among different treatments for the same crop.

2.3　等氮配施有机肥作物产量变化

产量趋势线即利用产量年际波动曲线拟合的线性趋势线($y=kx+b$), 可以量化产量随时间变化情况, 其中斜率 k 表示产量的变化值[16]。长期不施肥处理产量的变化实质上反映出长期不施肥条件下土壤基础地力的变化。如图 2 所示, 长期不施肥(CK)处理玉米产量表现为下降趋势(k 为负值), 降幅为 5.45 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$, 这是由于土壤养分不断被耗竭, 供应能力逐渐降低。长期不施肥处理大豆产量趋于稳定(k 为正值), 增幅为 1.50 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$, 主要原因可能是大豆根瘤菌能够固定空气中的氮气, 为大豆的生长提供氮素营养, 且

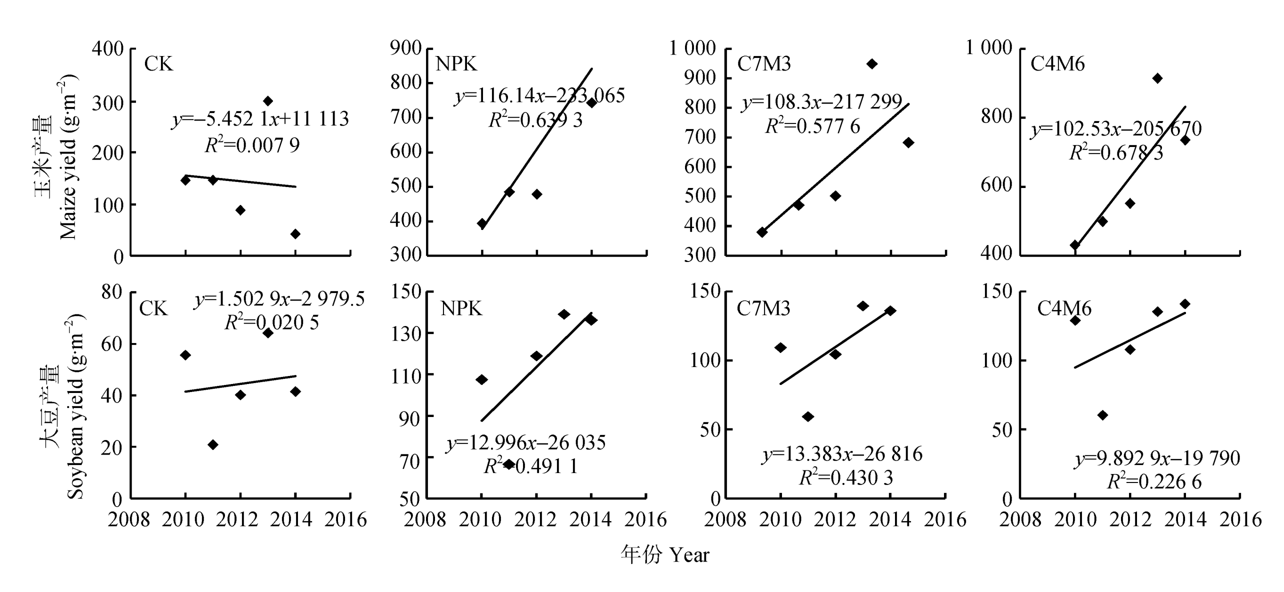


图 2 等氮配施有机肥条件下玉米/大豆套作系统的作物产量年际变化趋势

Fig. 2 Variation trends of crops yields of maize-soybean relay intercropping system for the treatments of organic fertilizer combined with inorganic fertilizer under the same nitrogen rate

CK: 不施肥; NPK: 无机肥施用; C7M3: 70%NPK+30%农家肥; C4M6: 40%NPK+60%农家肥。CK: no fertilizer; NPK: chemical fertilizers; C7M3: 70% N coming from chemical fertilizer and 30% N coming from cattle manure; C4M6: 40% N coming from chemical fertilizer and 60% N coming from cattle manure.

大豆的残根落叶遗留在地里，能增加土壤中的养分和有机质，培肥地力[17-18]。

长期施肥处理玉米和大豆产量均呈增长趋势，其中玉米季增幅(k 值)大小顺序为：NPK>C7M3>C4M6，大豆季增幅(k 值)大小顺序为：C7M3>NPK>C4M6，但各施肥处理间产量变化差异不显著，说明均衡施肥及配施有机氮肥是维持喀斯特峰丛洼地玉米和大豆高产的有效途径，并且配施有机粪肥可以作为喀斯特峰丛洼地长期有效的施肥措施。

2.4 配施有机氮肥土壤养分表观平衡

玉米季长期不施肥使土壤 N、P、K 营养元素均表现出亏缺，年均亏缺量分别为：30.5 kg·hm^{-2}、13.8 kg·hm^{-2}和 21.1 kg·hm^{-2}(表 2)。长期施用无机化肥(NPK)处理，N、P、K 均表现出盈余状态；有机氮代替 30%无机氮(C7M3)处理中，N 和 P 均表现为盈余，且盈余量分别比 NPK 处理高 2.9 kg·hm^{-2}和 2.0 kg·hm^{-2}，而 K 为亏缺，年均亏缺 4.5 kg·hm^{-2}；有机氮代替 60%无机氮(C4M6)处理中，N 和 P 也表现为盈余，K 为亏缺，亏缺量为 19.5 kg·hm^{-2}。可见在玉米季，有机氮肥代替无机氮肥对土壤 N、P 有积极的补给作用，而有机粪肥代替化肥使土壤 K 表现为亏缺，并随有机肥量增多，亏缺量越大。

大豆季 CK 处理 N、P、K 元素均表现出亏缺状态(表 2)。施肥处理中 P 和 K 均表现为盈余状态，C7M3

表 2 等氮配施有机肥条件下玉米/大豆套作系统土壤氮、磷、钾素表观平衡

Table 2 Apparent balances of N, P_2O_5 and K_2O of maize-soybean relay intercropping system under different fertilization treatments

处理 Treatment	作物 Crop	投入量 Input (kg·hm^{-2})			输出量 Output (kg·hm^{-2})			收支 Budget (kg·hm^{-2})		
		N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
CK	玉米 Maize	0	0	0	30.5	13.8	21.1	−30.5	−13.8	−21.1
NPK		200	90	120	121.5	52.9	117.0	78.5	37.1	3.0
C7M3		200	90	120	118.6	50.9	124.5	81.4	39.1	−4.5
C4M6		200	90	120	127.2	58.3	139.5	72.8	31.7	−19.5
CK	大豆 Soybean	0	0	0	29.4	6.4	13.9	−29.4	−6.4	−13.9
NPK		22.5	60	67.5	71.1	15.9	51.3	−48.6	44.1	16.2
C7M3		22.5	60	67.5	69.1	15.7	50.9	−46.6	44.3	16.6
C4M6		22.5	60	67.5	71.1	16.9	55.9	−48.6	43.1	11.6
CK	玉米/大豆套作 Maize/ soybean	0	0	0	59.9	20.2	35.0	−59.9	−20.2	−35.0
NPK		222.5	150	187.5	192.6	68.8	168.3	29.9	81.2	19.2
C7M3		222.5	150	187.5	187.7	66.6	175.4	34.8	83.4	12.1
C4M6		222.5	150	187.5	198.3	75.2	195.4	24.2	74.8	−7.9

CK: 不施肥; NPK: 无机肥施用; C7M3: 70%NPK+30%农家肥; C4M6: 40%NPK+60%农家肥。CK: no fertilizer; NPK: chemical fertilizers; C7M3: 70% N coming from chemical fertilizer and 30% N coming from cattle manure; C4M6: 40% N coming from chemical fertilizer and 60% N coming from cattle manure.

处理与 NPK 盈余量几乎相当, C4M6 处理略有降低(分别低 1.0 $kg·hm^{-2}$, 4.6 $kg·hm^{-2}$); 而 N 均表现为亏缺状态, C4M6 与 NPK 处理亏缺量相近(48.6 $kg·hm^{-2}$), C7M3 处理亏缺量稍低(46.6 $kg·hm^{-2}$), 且施肥处理 N 亏缺量是不施肥处理的 1.58~1.65 倍, 而大豆产量却是不施肥处理的 2 倍多。这可能是因为施肥促进了大豆根瘤菌对空气中 N 的固定, 为提高大豆产量起到积极作用。

从作物单季来看, 土壤表现出不同元素的亏缺, 玉米季 K 亏缺, 大豆季 N 亏缺, 作物轮作对土壤营养元素亏缺情况有互补与改善作用。综合玉米与大豆轮作分析土壤年际养分收支情况, 如表 2 所示, CK 处理 N、P 和 K 均表现出亏缺, 施肥处理中只有 C4M6 处理 K 表现出亏缺, 亏缺量为 7.9 $kg·hm^{-2}$, 其余均为盈余, 并且 P 盈余量最大。

3　讨论

不施肥土壤中作物产量是土壤基础肥力和环境的综合表现, 在一定环境下作物产量可以反映土壤基础肥力状况[19-20]。不施肥处理中玉米产量随种植时间延长处于下降趋势, 降幅为 5.45 $g·m^{-2}·a^{-1}$。与玉米产量情况不同, 不施肥处理中大豆产量随时间推移呈增加趋势。有研究[21-23]显示大豆的 N 来源以根瘤固氮为主, 其次是土壤 N, 这可能是不施肥处理中大豆产量仍保持上升趋势的原因, 掩盖了土壤基础地力下降的表观现象; 同时这也解释了本研究施肥处理中土壤 N 表观亏缺大于不施肥处理, 而产量是不施肥处理 2 倍多现象的原因。

施肥有利于养分的快速供应, 是农作物增产的重要措施[10], 合理施肥是维持农田可持续生产力的重要手段。李秀英等[24]在褐潮土研究中发现, 平衡施用化肥 NPK 以及化肥 NPK 配施有机肥均可使作物持续高产; 郝小雨等[25]在黑土研究中亦发现, 均衡施肥(NPK)及配施有机肥(MNPK)处理作物产量总体上呈增加趋势。张亚杰等[12]在喀斯特地区对作物产量研究中发现, 施肥不仅对玉米产量有极显著提高作用, 对大豆产量也具有同样的增产效果。本研究发现施肥处理玉米和大豆产量均极显著高于不施肥处理, 分别是不施肥处理的 4.15~4.36 倍和 2.47~2.58 倍, 且施肥处理间没有显著差异($P>0.05$); 并且在短期来看, 施肥处理下这 2 种作物产量都随时间推移处于上升变化趋势。说明均衡施用化肥(NPK)以及均衡配施有机肥是增加喀斯特峰丛洼地作物产量的有效措施, 并且化肥(NPK)配施有机氮肥可与单施化肥(NPK)达到同样的增产效果, 也说明从作物产量方面考虑, 在喀斯特峰丛洼地部分有机氮肥可以替代部分化学氮肥。

农田养分平衡的本质是养分被作物消耗和施肥投入之间的平衡, 其盈亏是农田土壤养分时空变化的主要驱动因素, 是衡量农业可持续发展的重要因素之一[26-27]。本研究中, 玉米季 N、P 在施肥处理中均表现为盈余状态, 有机肥处理中, K 表现为亏缺状态, 且随有机肥量增加而增加, 在这 3 种施肥处理中, K 可能是限制元素[3]。粪肥替代 60%化学氮肥处理中有机肥含量较多, 供给土壤的 K 更加迟缓而长效, 使土壤中速效钾含量最高, 且显著高于 NPK 处理, 这可能是 C4M6 处理虽然 K 表观平衡呈亏缺状态, 仍保持最高产量的原因。因此对于玉米单季来说, 可以适当降低 N、P 投入, 短期内可以保持 K 现有水平[8]。大豆季, 施肥处理中 P、K 元素均呈现盈余状态, N 表观亏缺, 本文中养分平衡计算法忽略了大豆根瘤菌对游离态氮的固定作用。张兴梅等[28]报道大豆所需的 N 源有 50%甚至更高比例来源于生物固氮。本研究中不施肥处理大豆产量有增加趋势, 施肥处理大豆产量显著高于不施肥处理。由此推断, 大豆季, 可以适当降低 P、K 元素投入, 保持 K 投入量。

综合两种作物对土壤养分的表观平衡影响来看, 利用不同作物对营养元素需求量不同的特点, 合理进行套种、间种或轮作, 利用前茬作物的肥料残效对后茬作物的影响, 在一个周期中“统筹施肥”, 可以适当平衡土壤元素的盈亏状态[29-32]。本研究中, 施肥处理玉米季 N 的盈余, 正好用于大豆产生根瘤菌前对 N 的需求, 大豆季 K 的盈余可以弥补玉米季 K 的亏缺, 从而提高氮肥、钾肥的利用率, 降低土壤中的盈余量, 进而降低 N、K 的流失。土壤养分平衡原则允许养分平衡有一定的赤字或盈余, C4M6 处理 K 亏缺量仅为 7.9 $kg·hm^{-2}·a^{-1}$, 比鲁如坤等[31]报道的几种土壤允许赤字量小 10 倍左右, 推测以本研究中 C4M6 施肥水平, 可以短期保持 K 的平衡, 具体允许量有待进一步研究。P 在两季作物中均表现为盈余, 且年均盈余量大于郝小雨等[25]研究中常量化肥及常量化肥配施有机肥处理盈余量(其年均 P 盈余量为 33.4 $kg·hm^{-2}$、61.2 $kg·hm^{-2}$), 所以在喀斯特峰丛洼地应适当降低磷肥的投入。

在土层较浅、生态环境脆弱的喀斯特峰丛洼地区域[33-34], 保持农田可持续生产力尤为重要, 即既要注重作物产量, 亦要注重土壤环境变化。从 3 个时间段土壤养分统计数据来看, NPK 化肥配施有机

肥对土壤营养条件均有不同程度的改善作用。添加粪肥替代 60%化肥氮处理中有机质含量显著高于 30%粪肥和纯化肥处理，全氮、速效磷和速效钾含量随着有机肥量的增加而增加，说明有机肥添加提高了土壤基础地力。短时间来看，土壤 pH 在各施肥处理间差异不明显，说明粪肥替代部分化肥短期内对土壤的酸度影响不大。5 年作物产量显示，60%粪肥替代率处理高于纯化肥处理，N、P 盈余量低于化肥处理，说明 C4M6 处理保持作物高产，同时降低了 N、P 的流失风险。如果以平均产量的 95%~105%作为有机肥替代率目标，C7M3 处理作物产量是 NPK 处理的 97.6%，与其相当。所以在喀斯特峰丛洼地，从农业可持续性来说，粪肥替代部分化肥是可行措施。

综上，基于作物套作、大豆固氮作用以及磷肥的缓效作用，在喀斯特峰丛洼地可以实行玉米季“减氮、稳磷和增钾”，大豆季“稳氮、减磷、略减钾”的施肥措施，利用有机粪肥替代部分化肥，通过增加土壤有机质、全氮等来实现培肥地力和土壤养分平衡。

4 结论

利用环江站田间定位试验，通过对不同粪肥量替代化肥氮对玉米/大豆套作的作物产量及土壤养分平衡特征研究，得出以下结论:

1)从 2010—2014 年的土壤养分含量来看，施肥处理土壤有机质、全氮、速效磷及速效钾含量均高于不施肥处理，其中 C4M6 处理有机质含量显著高于 NPK 处理($P<0.05$)，全氮、速效磷和速效钾含量随着有机粪肥用量的增加而增加。有机肥代替部分化学氮肥提高土壤养分含量，培肥地力。

2)从作物平均产量来看，长期不同施肥处理对喀斯特峰丛洼地棕色石灰土作物产量具有显著提高作用，玉米和大豆产量分别是不施肥处理的 4.15~4.36 倍和 2.47~2.58 倍。不同施肥处理的增产效果为 C4M6>NPK>C7M3，但施肥处理间差异不显著。有机肥代替部分化学氮肥能显著增加作物产量，并且与化学肥料达到同样的增产效果。

3)施肥处理中不同作物季表现出不同元素的亏缺，玉米季表现为 K 亏缺(NPK 处理除外)，大豆季表现为 N 亏缺。综合两季作物，只有 C4M6 处理 K 表现亏缺，亏缺量为 7.9 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。P 盈余量较大，不同处理分别为 81.2 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ (NPK)、83.4 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ (C7M3)和 74.8 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ (C4M6)。

4)在喀斯特峰丛洼地玉米/大豆套作制度下，基于作物产量及土壤养分平衡特征，提出有机粪肥可以代替部分化肥施用，在玉米季适当“减氮、稳磷和增钾”，大豆季“稳氮、减磷和减钾”的施肥措施。

参考文献 References

[1] 王克林，苏以荣，曾馥平，等. 西南喀斯特典型生态系统土壤特征与植被适应性恢复研究[J]. 农业现代化研究，2008, 29(6): 641–645
Wang K L, Su Y R, Zeng F P, et al. Ecological process and vegetation restoration in Karst Region of Southwest China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2008, 29(6): 641–645

[2] 张伟，陈洪松，苏以荣，等. 不同作物和施肥方式对新垦石灰土土壤肥力的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 925–930
Zhang W, Chen H S, Su Y R, et al. Effects of reclamation and fertilization on calcareous soil fertility in the initial period of cultivation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(4): 925–930

[3] 刘淑娟，张伟，王克林，等. 桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征[J]. 生态学报，2011, 31(11): 3036–3043
Liu S J, Zhang W, Wang K L, et al. Spatiotemporal heterogeneity of topsoil nutrients in karst peak-cluster depression area of Northwest Guangxi, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11): 3036–3043

[4] Chang E H, Chung R S, Tsai Y H. Effect of different application rates of organic fertilizer on soil enzyme activity and microbial population[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(2): 132–140

[5] 丁英，王飞，贾登泉，等. 有机肥对土壤培肥作用长期定位研究[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(10): 1857–1861
Ding Y, Wang F, Jia D Q, et al. Long-term located study of organic manure application effects on soil fertility[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2014, 51(10): 1857–1861

[6] 马俊永，李科江，曹彩云，等. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 236–241
Ma J Y, Li K J, Cao C Y, et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on fluvo-aquic soil fertility and crop yield[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(2): 236–241

[7] 赵立勇，韩晓日，杨劲峰，等. 长期定位施肥对作物产量及土壤有效养分的影响[J]. 杂粮作物, 2008, 28(1): 45–48
Zhao L Y, Han X R, Yang J F, et al. Effect of long term fertilization on the crops output and the soil available nutrient[J]. Rain Fed Crops, 2008, 28(1): 45–48

[8] 林治安，赵秉强，袁亮，等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809–2819
Lin Z A, Zhao B Q, Yuan L, et al. Effects of organic manure and fertilizers long-term located application on soil fertility and crop yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2809–2819

[9] 高洪军，彭畅，张秀芝，等. 长期不同施肥对东北黑土区玉米产量稳定性的影响[J]. 中国农业科学，2015, 48(23):

4790–4799
Gao H J, Peng C, Zhang X Z, et al. Effect of long-term different fertilization on maize yield stability in the Northeast black soil region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4790–4799
[10] 高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 318–325
Gao H J, Zhu P, Peng C, et al. Effects of partially replacement of inorganic N with organic materials on nitrogen efficiency of spring maize and soil inorganic nitrogen content under the same N input[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 318–325
[11] 陈志龙, 陈杰, 许建平, 等. 有机肥氮替代部分化肥氮对小麦产量及氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(7): 55–57
Chen Z L, Chen J, Xu J P, et al. Effects of organic fertilizer nitrogen replacing part of chemical fertilizer nitrogen on yield and nitrogen utilization ratio of wheat[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(7): 55–57
[12] 张亚杰, 邓少虹, 李伏生, 等. 喀斯特地区春玉米套作夏大豆下作物产量和农田碳储量对有机肥与化肥配施的响应[J]. 南方农业学报, 2015, 46(9): 1584–1590
Zhang Y J, Deng S H, Li F S, et al. Effect of organic manure and chemical fertilizer combined application on crop yield and field carbon storage under spring maize intercropped with summer soybean in karst region[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46(9): 1584–1590
[13] 樊保宁, 何永群, 陈金洪. 广西涉农加工业中主要有机废弃物肥效成分的研究[J]. 磷肥与复肥, 2013, 28(5): 72
Fan B N, He Y Q, Chen J H. Study on compositions of applied organic waste from agricultural processing industry in Guangxi[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2013, 28(5): 72
[14] 宁琳. 广西主要有机肥资源调查及蚕沙快速腐熟技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013: 19–20
Ning L. Survey of main organic fertilizer resources in Guangxi and rapid composting of silkworm excrement[D]. Nanning: Guangxi University, 2013: 19−20
[15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
Lu R K. Method on Agricultural Soil Chemical Analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
[16] Chauhan S K, Chauhan C P S, Minhas S. Effect of cyclic use and blending of alkali and good quality waters on soil properties, yield and quality of potato, sunflower and sesbania[J]. Irrigation Science, 2007, 26(1): 81–89
[17] 山东农学院. 作物栽培学(北方本　下册)[M]. 北京: 农业出版社, 1980
Shandong Agricultural College. Crop Cultivation (Northern Part Ⅱ)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1980
[18] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 66–71
Han X Z, Wang F X, Wang F J, et al. Effects of long-term organic manure application on crop yield and fertility of black soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(1): 66–71
[19] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期不同施肥模式对我国玉米产量可持续性的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(6): 82–87
Li Z F, Xu M G, Zhang H M, et al. Effects of different long-term fertilizations on sustainability of maize yield in China[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(6): 82–87
[20] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期施肥下中国主要粮食作物产量的变化[J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2407–2414
Li Z F, Xu M G, Zhang H M, et al. Grain yield trends of different food crops under long-term fertilization in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(7): 2407–2414
[21] 董守坤, 刘丽君, 孙聪姝, 等. 利用 ^{15}N 标记研究氮素水平对大豆根瘤生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 985–988
Dong S K, Liu L J, Sun C S, et al. Effects of nitrogen levels on nodule growth of soybean using ^{15}N tracing method[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 985–988
[22] 陈慧, 邸伟, 姚玉波, 等. 不同大豆品种根瘤固氮酶活性与固氮量差异研究[J]. 核农学报, 2013, 27(3): 379–383
Chen H, Di W, Yao Y B, et al. Study on the difference of nodule nitrogenase activity and amount of nitrogen fixation of different soybean varieties[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(3): 379–383
[23] 龚振平, 金喜军, 马春梅, 等. 春大豆对不同来源氮素吸收利用的研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1138–1141
Gong Z P, Jin X J, Ma C M, et al. Study on the absorption and utilization of various source nitrogen by spring soybean[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(5): 1138–1141
[24] 李秀英, 李燕婷, 赵秉强, 等. 褐潮土长期定位不同施肥制度土壤生产功能演化研究[J]. 作物学报, 2006, 32(5): 683–689
Li X Y, Li Y T, Zhao B Q, et al. The dynamics of crop yields under different fertilization systems in drab fluvoaquic soil[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(5): 683–689
[25] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 178–185
Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, et al. Characteristics of crop yield and nutrient balance under different long-term fertilization practices in black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(16): 178–185
[26] 孙波, 潘贤章, 王德建, 等. 我国不同区域农田养分平衡对土壤肥力时空演变的影响[J]. 地球科学进展, 2008, 23(11): 1201–1208
Sun B, Pan X Z, Wang D J, et al. Effect of nutrient balance on spatial and temporal change of soil fertility in different agriculture area in China[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(11): 1201–1208
[27] 刘芬, 王小英, 赵业婷, 等. 渭北旱塬土壤养分时空变异与养分平衡现状分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 110–119
Liu F, Wang X Y, Zhao Y T, et al. Spatial and temporal variation of soil nutrient and nutrient balance status in Weibei rainfed highland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 110–119
[28] 张兴梅, 蔡德利, 王法清, 等. 不同大豆品种在养分吸收及

产量上的比较[J]. 土壤肥料, 2004, (3): 41–42
Zhang X M, Cai D L, Wang F Q, et al. Comparison of nutrient uptake and yield of different varieties of soybean[J]. Soils and Fertilizers, 2004, (3): 41–42

[29] 诸葛玉平, 苏志慧, 张彤, 等. 北京郊区有机蔬菜土壤养分平衡及 $\delta^{15}N$ 特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2313–2318
Zhuge Y P, Su Z H, Zhang T, et al. Soil nutrients balance and $\delta^{15}N$ characteristics for organic vegetable production in Beijing suburbs[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(11): 2313–2318

[30] 王孟雪, 张玉先. 麦/玉/豆轮作制度下不同施肥措施对大豆产量的影响[J]. 大豆科学, 2009, 28(6): 1040–1043
Wang M X, Zhang Y X. Fertilization measures affects soybean yield under wheat-maize-soybean rotation cropping[J]. Soybean Science, 2009, 28(6): 1040–1043

[31] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究Ⅲ. 全国和典型地区养分循环和平衡现状[J]. 土壤通报, 1996, 27(5): 193–196
Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Research of agricultural ecosystem nutrient cycling and balance in typical areas of China Ⅲ. Status of nutrient cycling and balance in the typical areas of China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(5): 193–196

[32] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究Ⅳ. 农田养分平衡的评价方法和原则[J]. 土壤通报, 1996, 27(5): 197–199
Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Research of agricultural ecosystem nutrient cycling and balance in typical areas of China Ⅳ. Evaluation method and principles of farmland nutrient balance[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(5): 197–199

[33] 兰安军, 张百平, 熊康宁, 等. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析[J]. 地理研究, 2003, 22(6): 733–741
Lan A J, Zhang B P, Xiong K N, et al. Spatial pattern of the fragile Karst environment in southwest Guizhou Province[J]. Geographical Research, 2003, 22(6): 733–741

[34] 刘芳, 王世杰, 刘元生, 等. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 639–644
Liu F, Wang S J, Liu Y S, et al. Changes of soil quality in the process of Karst rocky desertification and evaluation of impact on ecological environment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 639–644